

기동형 로드셀 감지부의 설계변수에 따른 비선형 거동해석

이 춘 열* · 강 대 임**

(1999년 7월 1일 접수)

Finite Element Analysis of Nonlinear Behavior of a Column Type Sensing Element for Load Cell According to Design Parameters

Choon-Yeol Lee and Dae-Im Kang

Key Words: Column Type Load Cell(기동형 로드셀), Strain Gauge(스트레인 게이지), Nonlinearity(비선형), Measurement Error(측정오차), Finite Element Method(유한요소법), Aspect Ratio(세장비)

Abstract

Recently, force measurement systems are commonly used in many industrial fields and the precision of the measurement system is getting more important as the industry needs more precise tools and instruments to make high quality products. However, a high precision force measurement system is hard to make unless we know precisely the causes, quality and quantity of measurement errors in advance. In this work, many possible mechanical causes of measurement errors are reviewed including ratio of length to diameter of sensing part, radius of contact area, radius of bearing part, ratio of material properties and change of boundary conditions. Also, the measurement errors are analyzed by nonlinear finite element method and the nonlinear behavior of the errors are investigated. The results can be used to design force measurement systems and expected to be very useful especially for compact type load cells.

1. 서 론

스트레인 게이지(strain gauge)식 로드셀(load cell)은 외력에 의해 비례적으로 변하는 탄성체의 변형과 이를 전기적인 신호로 바꾸어주는 스트레인 게이지를 이용한 하중감지센서이며 크게 전기적 회로부와 탄성변형체로 구성되어 있고 힘이 가해질 때 물리적 변형을 발생한다. 이 물리적 변형을 전기적 회로부의 핵심부가 되는 스트레인 게이지를 이용하여 전기저항 변화로 변환시키고 휘스톤 브리지(Wheatstone bridge) 전기회로를 구성하여 정밀한 전기적 신호로 변환시키게 된다. 최근에는 항공 우주, 교통, 중공업 등의 분야에서 대용량의

스트레인 게이지식 로드셀이 사용되고 있으며 스트레인 게이지식 로드셀은 가동부분이 없고 보수가 용이하며, 계량시 힘이 작고 고유진동수가 크므로 계량시간이 짧으며, 피로 특성이 좋고 반영구적인 수명을 가지고 있으며 구조가 견고하고 사용환경에 제한이 없는 등의 장점이 있다. 이러한 로드셀의 개발에서 중요한 점은 간편하면서도 측정 후의 측정 오차가 작아야 한다는 것이며 이에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다.

Bray와 Robinson^(1,2)은 접촉면에서 발생하는 오차 요인들에 의한 영향을 연구하였다. 특히, Robinson⁽²⁻⁴⁾은 축대칭 및 불규칙 축대칭 하중으로 인해 발생하는 오차의 수준을 연구하였다. Yamaguchi 등⁽⁵⁾은 로드셀 재료의 비선형 거동의 요인으로서 크립의 효과를 연구하였으며 Sundin 등⁽⁶⁾은 로드셀을 지지하는 바닥의 마찰계수가 극대값과 극소값일 때의 변형을 게이지 부착부근의 변형을

* 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail: cylee@yu.ac.kr,

TEL : (053)810-2570 FAX : (053)813-3703

** 회원, 한국표준과학연구원 역학표준부

분포를 유한요소법을 이용해 연구하였다. Mitchell 등⁽⁷⁾은 로드셀의 끝 부분에 작용하는 다양한 하중조건에 대해 유한요소 해석이 유용하다는 것을 실험결과와 비교하였으며 Williams⁽⁸⁾는 축대칭 하중을 받는 반무한 실린더모델에 대하여 유한 요소 해석을 수행하여 유한 실린더해석에 적용할 수 있음을 보여주었다. 국내에서는 강대입⁽⁹⁾이 증강(build-up) 기법을 사용하여 대용량의 로드셀을 개발하면서 그에 따른 여러 가지의 오차 요인에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 스트레인 게이지식 로드셀의 종류 중 대용량 고정밀도 측정에 주로 사용되는 압축형 기동형 로드셀에 대하여 연구하였다. 먼저 이러한 기동형 로드셀의 정확도에 미치는 요인을 분석하고 또한 로드셀을 구성하는 설계변수에 따른 로드셀의 비선형 거동에 대해 유한요소법으로 정량적 해석을 수행하였다.

2. 설계변수(Design Parameter)

먼저 Fig. 1에는 본 연구에서 고려되는 압축형 기동형 로드셀의 기본형상 및 설계변수가 나타나 있다. 로드셀 감지부(sensing element)의 아래쪽은 바닥과 접촉하는 부분이며 위 부분은 보통 구형의 형상을 갖고있는 접촉부이다. 위쪽의 베어링부를 통하여 하중을 전달받게되며 하중의 형태는 베어링부의 윗면에 분포하중이 가해진다. 이러한 압축형 로드셀의 감지부를 형성하고 있는 설계변수들은 Fig. 1에 나타난 바와 같으며 본 연구에서 고려된 설계변수로서 먼저 감지부의 평행부의 길이 L 및 지름 D , 감지부와 베어링부가 접촉하는 구형 감지부 접촉면의 구반경 R_L , 베어링부의 지름 D_B , 적용하중 및 감지부와 베어링부의 탄성계수의 비등을 고려하였다.

본 연구에서 사용된 감지부의 물성치로서는 감지부의 재료로 많이 사용되는 니켈-크롬-몰리브덴강인 SNCM 8의 물성치를 사용하였으며 탄성계수(E_L)는 207 GPa이고, 푸아송 비(ν_L)는 0.3이 사용되었다. 또한 유한요소해석에는 ABAQUS를 사용하였으며 유한요소로서 로드셀의 기하학적 형상과 하중조건을 고려하여 축대칭 8절점 사각형 요소를 사용하였다. 경계조건으로서는 감지부의 아래 면에서 단순지지 경계조건을 사용하였으며 베어링부와 감지부의 경계면에서의 접촉을 고려하기 위해 접촉경계조건을 이용하였다.

각각의 세장비에 대해서 베어링부의 반경, 감

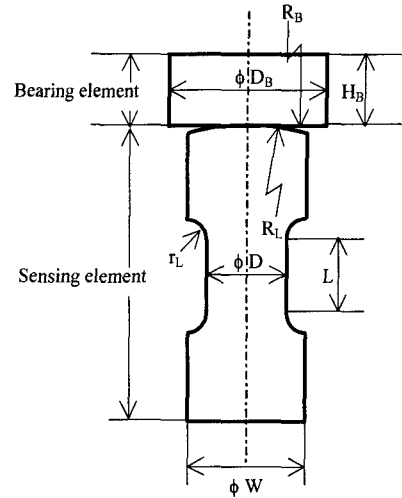


Fig. 1 Design parameters for a column type sensing element

지부 접촉부위의 반경, 탄성계수의 비 및 적용하중 등 5개의 설계변수들을 변화시켜서 변형률 분포를 유한요소법을 이용하여 해석하였으며 주로 스트레인 게이지가 부착되는 감지부의 평행부 중심부근에서의 변형률 분포를 해석하였다.

3. 세장비(Aspect Ratio)에 따른 영향

Fig. 1로부터 하중을 받는 접촉부에서부터 스트레인 게이지가 부착되는 평행부까지의 거리가 클수록 평행부에서의 변형률 분포가 일정하며 끝효과가 작아지게되는 것은 쉽게 알 수 있다. 그러므로 감지부에서 평행부의 길이는 끝효과 영향이 미치지 않도록 길어야 하나 길이가 길어질수록 로드셀 전체의 크기가 커지게 되며 고유진동수 및 좌굴에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 감지부지름대 평행부 길이의 비인 세장비(L/D)가 작으면서도 고정밀도를 갖는 압축형 기동형 로드셀이 개발되고 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 이러한 세장비를 설계변수로 하여 요구되는 오차수준에 따른 최소의 세장비를 알아내기 위하여 세장비에 따른 유한요소해석 및 오차해석을 수행하였다. 유한요소 해석시 세장비는 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 등으로 변화시키면서 해석하였으며 해석결과는 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2에는 세장비에 따른 변

형률의 분포와 이상적인 변형률 값과의 차이 즉 편차(deviation)가 스트레인 게이지가 부착되어 있는 평행부의 중앙에 대하여 나타나 있으며 세장비가 2.0 이상일 때는 편차가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 유한요소해석의 결과는 참고문헌⁽¹⁰⁾과 비교하였으며 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3은 평행부의 중심에서의 변형률의 편차를 세장비에 따라 나타낸 것으로서 세장비가 1.0일 때는 편차가 약 $24 \mu\text{m/m}$ 인 데 반해 2.0 이상에서부터는 급격히 0으로 수렴하고 있는 모양을 나타내고 있다. 특히 3.0 이상이 되면 편차는 $0.1 \mu\text{m/m}$ 이하가 되며 고정밀 로드셀로 사용 가능함을 알 수 있다.

Fig. 4에는 감지부 전체의 높이(H)에 대해서 감지부 밑면으로부터의 높이(h)에 따른 정규화된 변형률(normalized strain)의 분포를 나타내고 있다. 정규화된 변형률은 유한요소해석에 의한 변형률을 이상적인 변형률(nominal strain)으로 나눈 값이며 세장비가 커짐에 따라 변형률의 분포가 균일한 구역이 점점 넓어지는 것을 알 수 있다. 이렇게 변형률이 일정한 구역으로부터 주어진 스트레인 게이지의 내부에서 변형률이 일정하도록 하는 최소 세장비를 알아낼 수 있으며 스트레인 게이지를 접착하여야 하는 위치도 정할 수 있게 된다. 또한 감지부의 양끝단으로 갈수록 변형률의 편차가 커지게 되는 데 이는 양끝단에서의 응력집중과 끝 효과의 영향으로 인한 것이다.

Fig. 5는 세장비가 3이며 적용하중이 500 kN일 때의 감지부의 평행부 중심부위에서의 변형률 분포를 나타내고 있다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 사용하는 스트레인 게이지의 크기를 6 mm로 가정하고 중심부에 부착할 경우 변형률과 이상적인 변형률과의 오차가 10^{-7} 이내임을 알 수 있다.

4. 감지부 반경에 따른 영향

본 절에서는 세장비가 3일 경우에 감지부의 반경 R_L 을 100, 300, 500 mm 등으로 변화시키면서 감지부의 거동을 파악하였다. Fig. 6에는 세장비가 3일 때 적용하중 $F=500 \text{ kN}$, 베어링부의 반경 $r_B=80 \text{ mm}$, 베어링부와 감지부의 탄성계수의 비 $E_B/E_L=1$ 일 때 감지부의 반경 R_L 이 변형률 분포에 미치는 영향이 나타나 있다. 감지부의 반경이 100 mm일 때를 제외

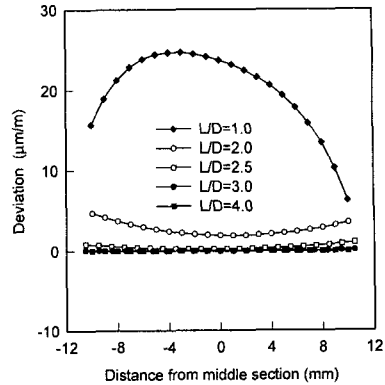


Fig. 2 Distribution of axial surface strains along the distance from middle section with $R_L=300 \text{ mm}$ according to aspect ratio

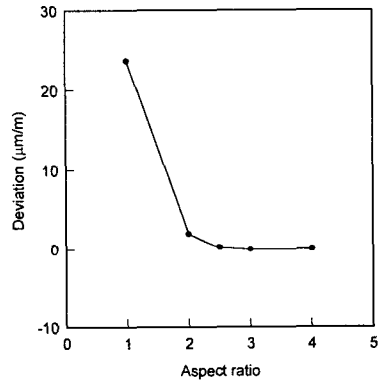


Fig. 3 Deviation of analyzed axial surface strain at the middle section with $R_L=300 \text{ mm}$

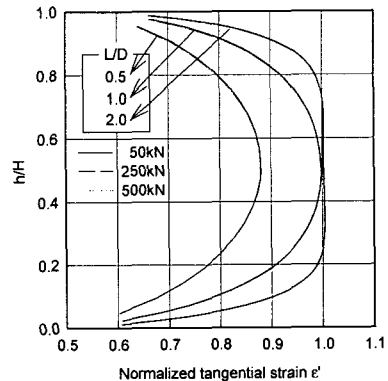


Fig. 4 Normalized tangential strain of sensing part as a function of relative axial position h/H for different applied forces and aspect ratio ($R_L=300 \text{ mm}$, $D_B=160 \text{ mm}$, $E_B/E_L=1.0$)

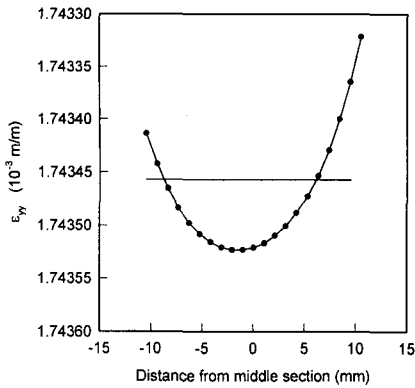


Fig. 5 Comparison of analyzed axial surface strain and nominal strain along the distance from middle section with $L/D=3$ ($F=500$ kN, $R_L=300$ mm, $D_B=160$ mm, $E_B/E_L=1.0$)

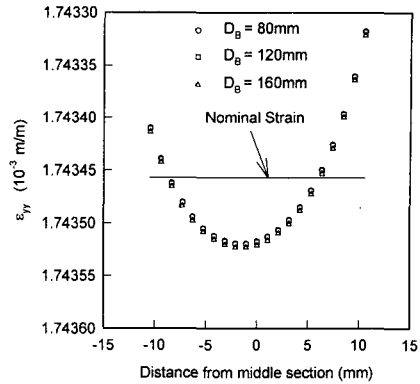


Fig. 7 Distribution of axial surface strain along the distance from middle section according to D_B with $L/D=3$ ($F=500$ kN, $R_L=300$ mm, $E_B/E_L=1.0$)

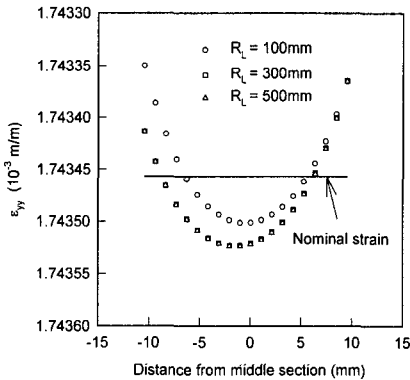


Fig. 6 Distribution of axial surface strain along the distance from middle section according to R_L with $L/D=3$ ($F=500$ kN, $D_B=160$ mm, $E_B/E_L=1.0$)

하고는 변형률의 분포가 전체적으로 큰 변화가 없음을 알 수 있으며 오차의 수준도 10^{-7} 이내임을 알 수 있다. 그러므로 감지부 반경의 영향은 세장비의 영향에 비해 작은 것을 알 수 있으며 세장비가 3이상인 경우 감지부의 반경의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

5. 베어링부의 반경에 따른 영향

본 절에서는 베어링부 반경에 의한 영향을 알아보기 위하여 베어링부의 반경을 제외한 다른 변수들의 값은 4절에서와 같게 하고 베어링부의 반

경 D_B 를 80, 120, 160 mm로 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 7에는 베어링부의 반경에 따른 축방향 변형률이 나타나 있으며 베어링부의 반경에 의한 변형률 분포의 변화는 없는 것을 알 수 있다.

6. 적용 하중 및 탄성계수에 따른 비선형성

일반적으로 압축을 받는 경우 적용하중이 증가함에 따라 감지부의 단면이 증가하게되고 이로 인하여 하중과 변형률의 관계는 비선형적이 된다. 이러한 비선형성의 정량적 해석을 위하여 기하학적 비선형성을 고려한 해석을 수행하였으며 해석의 결과는 Fig. 8 ~ 9에 나타나 있다.

Fig. 8에는 세장비에 따른 중앙 단면부에서의 비선형 양을 정리한 것으로 세장비가 3에서 1로 작아질수록 비선형 효과는 커지나 세장비가 0.5에서는 비선형 효과가 감소되고 있음을 보이고 있다. 일반적으로 세장비가 작아질수록 비선형효과가 클 것으로 예상되나 세장비가 0.5인 경우에는 감지부의 길이가 너무 짧아 하중이 가해지는 접촉하중의 영향이 감지부 중앙부위에 영향을 미치고 이것이 비선형효과를 일부 상쇄시키는 것으로 추정된다. 이러한 비선형 양은 실제로 로드셀을 제작할 때 해석에서 구한 양만큼의 비선형 보상을 함으로써 로드셀의 정밀도를 높이는 데 사용할 수 있다. 통상적으로 기동형 감지부를 이용하여 로드셀을 제작하면 앞에서 얻어진 감지부 구조의 비선형 거동에 의한 오차와 휘스톤 브리지의 비선형 오차가 혼합되어 나타

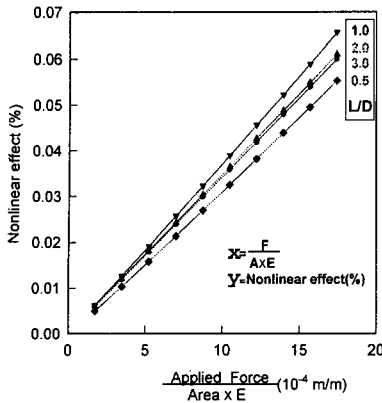


Fig. 8 Nonlinear behavior with variation of applied force for different aspect ratios

나게 된다.⁽¹³⁾ 이러한 비선형 오차는 휘스톤 브리지의 입력단에 게이지 상수가 큰 반도체 스트레인 게이지와 고정저항을 이용하여 보상되거나 별도의 비선형 보상회로를 제작하여 브리지 회로와 연결하여 보상되어진다.⁽¹⁴⁾ 또한 표준 힘(standard force)을 로드셀에 가하여 로드셀의 특성곡선을 구하면 로드셀의 비선형 오차를 수치적으로 보정(correction)할 수도 있다. 로드셀의 비선형성에 대한 정밀도를 높이기 위하여서는 비선형 오차의 크기를 작게 함과 동시에 오차의 경향이 대칭적인 포물선 형태가 되도록 하여야한다.

Fig. 9에는 세장비에 따른 비선형 오차가 나타나 있으며 정격하중의 약 50%에 해당하는 하중값에서 최고의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 세장비가 작을수록 오차의 크기가 커지며 대칭성도 훼손이 되고 있음을 알 수 있다. 그러나 세장비가 2이상이 되면서 오차가 급격히 감소하는 양상을 나타내고 있다.

일반적으로 감지부와 베어링부에는 서로 다른 재료가 사용되므로 본 절에서는 감지부와 베어링부의 재료가 서로 다른 경우 특히 탄성계수의 값이 다른 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 감지부와 베어링부가 모두 금속으로 구성되는 경우에는 탄성계수의 차이가 크지 않으나 본 연구에서는 사용 가능한 모든 재료에 대하여 검증한다는 목적으로 탄성계수의 비를 0.01부터 10000까지 큰 폭으로 변화시켜보았다.

Fig. 10은 적용하중의 최대값이 500 kN, 베어링부의 반지름이 80 mm, 세장비가 3일 때 감지부와 베어링부 각각의 탄성계수의 비(E2/E1)를 0.01부터 10000까지 변화 시켰을 때의 감지부 평행부 중심부 위에서의 변형률 분포를 나타내고 있다. 변형률

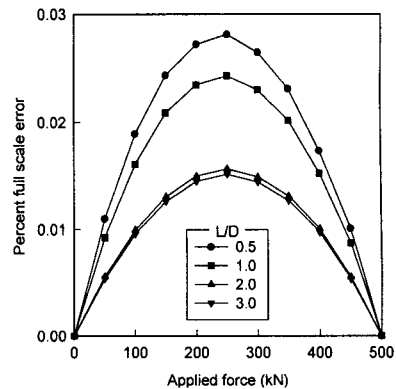


Fig. 9 Nonlinear effect of column type load cell according to applied force for different aspect ratios

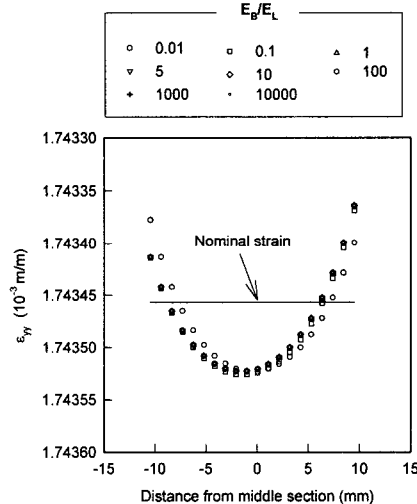


Fig. 10 Distribution of axial surface strain along the distance from middle section according to E_B/E_L with $L/D=3.0$ ($F=500$ kN, $R_L=300$ mm, $D_B=160$ mm)

값의 분포 범위는 이상적인 값과 비교해 보았을 때 $0.1 \mu\text{m/m}$ 정도의 편차를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 11에는 이러한 탄성계수의 비를 변화시키면 동시에 적용하중을 변화시켰을 때의 결과가 나타나 있다. 적용하중을 증가시킬 경우에 그에 따른 변형률 오차는 커질 것이라고 예상할 수 있으며 Fig. 11에서도 보듯이 하중오차의 정도가 하중의 값과 같이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 베어링부의 재료의 탄성계수의 값이 감지부에 비해 너무 작으면 오차의 양은 증가하는 것으로 나타났다. 보통의

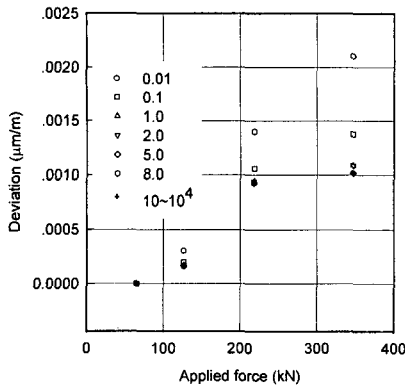


Fig. 11 Error according to applied forces for different elastic modulus ratios E_B/E_L with $L/D=3.0$ ($R_L=300\text{mm}$, $D_B=160\text{mm}$)

경우 탄성계수의 비가 1정도이며 그때 적용하중 105 N에서 오차의 양은 0.1 N이므로 상대오차는 10^{-3} 정도임을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 로드셀의 감지부의 변형률 분포에 영향을 미치는 설계변수들에 대하여 유한요소법을 사용하여 정성적, 정량적 해석을 수행하였다. 실제 로드셀에서 세장비가 작아지면 부피와 무게가 감소하고, 이동 비용 및 노력 과 제작사의 비용을 절감할 수 있는 등의 유리한 점이 있게되나 본 연구에 나타난 바와 같이 비선형 거동에 의한 오차가 커지게 되는 단점이 있게 된다. 그러므로 로드셀의 설계시 오차를 감소시키고 고정밀 로드셀을 설계하기 위하여는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다.

(1) 변형률 분포에 영향을 미치는 요인들 중에서 세장비는 가장 많은 영향을 미치며 Table 1에서와 같이 세장비가 3.0 이상일 때는 오차 수준이 1/25000 이하이므로 고정밀 로드셀의 기준(1/4000)에 부합된다.

(2) Table 2는 세장비가 정해져 있을 때 감지부의 반경 R_L 에 따른 오차의 변화량을 보여주고 있으며 세장비가 3.0 이상일 때는 거의 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다.

(3) 베어링부의 반경에 대해서는 세장비가 1.0이하일 경우 오차의 변동범위가 $10^{-4}\%$ 이고 세장비가 3.0 이상일 때는 $10^{-6}\%$ 이므로 베어링부의 반경에 의한 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

Table 1 Relative error according to L/D

Aspect ratio	Relative error
0.5	18/1000 ~ 15/1000
1.0	14/1000 ~ 13/1000
2.0	1.6/1000 ~ 1.5/1000
3.0	$3.8/10^5$ ~ $4.0/10^5$

Table 2 Relative error according to the R_L

Aspect ratio	Error	Relative error
		$R_L= 100, 300, 500(\text{mm})$
0.5		1.76/100 ~ 1.59/100
1.0		1.22/100 ~ 1.29/100
2.0		0.148/100 ~ 0.151/100
3.0		0.003/100 ~ 0.004/100

(4) 세장비가 작을수록 비직선성 오차의 크기가 커지게 되고 대칭성도 훼손이 되며 세장비가 2 이상이 되면서 오차가 급격히 감소하게된다.

(5) 탄성계수의 비에 따른 오차의 수준을 비교해 보면 세장비가 1.0 이하인 경우에 2% 정도의 차이를 보이고 있으며 세장비가 3.0 이상인 경우에는 0.0002%의 차이를 보이고 있다.

8. 참고문헌

- (1) Bray, A., 1972, "The Influence of Contact Stresses on the Characteristics of a Load Cell," *V D I Berichte*, pp. 43~52.
- (2) Robinson, G. M., 1986, "Errors due to Non-Uniform Axisymmetric Loading of Column Load Cells," *Mechanical Problems in Measuring Force and Mass*, Martinus Nijhoff Publishers.
- (3) Robinson, G. M., 1995, "Genetic Algorithm Optimization of Load Cell Geometry by Finite Element Analysis", pp. 927~952.
- (4) Robinson, G. M., 1995, "The Influence of Contact Stresses on Cylindrical Strain Gauge Load Cells," *Proceedings of the 14th Conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass*, Warszawa, Poland.
- (5) Yamaguchi, Y., Ishino, J. and Hida, N., 1984

- "Evaluation of Creep of Load Cells Utilizing Strain Gauges," *Proceedings of the 10th Conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, Japan.
- (6) Sundin, K. G. and Johsson, M., 1985, "A Stiff and Compact Impact-Force Transducer Based on Strain Measurement", Cambridge Univ.
- (7) Mitchell, R. A., Woolley, R. M. and Fisher, C. R. , 1971, "Formulation and Experimental Verification of an Axisymmetric Finite-element Structural Analysis", *J. of Res. of the National Bureau of Standards*, 75C, Nos 3 & 4, 155-163.
- (8) Williams, D. C., "The Effect of Non-uniform Loading on a Cylindrical Load Cell Billet," *MOM Technical Note* No; 40. National Physical Laboratory, Teddington, England.
- (9) Kang, D. I., 1994, "Design and Application of Force Measuring System Using BUILD-UP Technique," Dissertation, KAIST.
- (10) Pontius, P. E. and Mitchell, R. A., 1980, "Inherent Problems in Force Measurement," Fourth SESA International Congress On Experimental Mechanics, Boston, USA.
- (11) Sachdeva, T. D. and Ramakrishnan, C. V. , 1981, "A Finite Element Solution for Two-Dimensional Elastic Contact Problems with Friction," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 17, pp. 1257~1271.
- (12) Lee, C. Y. and Oden, J. T., 1993, "A Priori Error Estimation of hp-Finite Element Approximations of Frictional Contact Problems with Normal Compliance ", *International Journal of Engineering Science*, 31(6) pp. 927~952.
- (13) Measurement Group, 1988, "Strain Gage Based Transducers," Measurement Group, Inc., Raleigh, USA.
- (14) Tegelarr, P., 1970, "Some Development at TNO on Load Cells for Weighing Purpose," *VDI-Berichite*, No. 137.